

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 4 月 22 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25249013

研究課題名(和文) 強風下における砕波気液界面を通しての運動量およびスカロの輸送機構の実験的解明

研究課題名(英文) Experimental investigation of momentum and scalar transfer mechanism across the air-water interface with wave breaking at extremely high wind speeds

研究代表者

小森 悟 (KOMORI, SATORU)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60127082

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,600,000円

研究成果の概要(和文)：風波水槽実験により、高風速下においては気液界面を通しての熱および物質の輸送の風速依存性は通常の風速域と異なり、それらの輸送量が急増することを明らかにした。また、通常の風速域において、物質移動に及ぼす吹送距離の影響が小さいことを明らかにした。さらに、これらの運動量、熱、物質輸送実験を通して提案した運動量・熱輸送モデルを用いて、台風直下における運動量および熱の輸送量の推定を行い、これらの運動量・熱輸送モデルが台風強度の予測に及ぼす影響について検討を行った。その結果、新規提案の運動量・熱輸送モデルを使用した場合には、従来のモデルを使用した場合よりも、予測値が観測値により近づくことが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：Heat and mass transfer coefficients were measured in a big wind-wave tank. The measurements show that the wind speed dependence on heat and mass transfer coefficients at extremely high wind speeds is different to that at normal wind speeds and the coefficients rapidly increase with increasing wind speed. The effects of fetch on mass transfer across the wind-sheared air-water interface is negligibly small at normal wind speeds. In addition, the momentum and heat transfer fluxes under tropical cyclones were evaluated using our new momentum and heat transfer models and the intensities of tropical cyclones were forecasted by both our new and conventional models. The predictions show that our new models are more reliable than conventional models.

研究分野：流体力学

キーワード：流体力学 輸送現象論 台風 気候変動 海洋工学

1. 研究開始当初の背景

最近、大型化する台風やハリケーン等の熱帯性サイクロンやそれらに伴う集中豪雨等の異常気象が我が国のみならず東南アジアや北米の諸国に甚大な被害を与えている。これらの異常気象は大気・海洋間の運動量輸送（海水面抵抗）や熱の輸送に大きく支配され、その強さ故に地球温暖化の要因となるCO₂の大気・海洋間の交換量にも多大な影響を及ぼすことが指摘されている。これらの現象、つまり、強風下の大気海洋相互作用を具体的かつ科学的に明らかにするためには、台風なみの高風速を有する風波乱流場において運動量とスカラ（熱と物質）の輸送機構の解明および輸送量の評価のための実験的研究を行なわなければならない。特に、強風速を伴う荒天下では強い風応力（気液界面に働く剪断応力）による砕波、その激しい砕波による気流側への大量の液滴の飛散と気液界面への再付着（衝突）、液流側への大量の気泡の巻込み、大量の雨滴の気液界面衝突などが運動量およびスカラ輸送に重大な影響を及ぼすことになるので、これらの影響を明らかにしなければならない。

2. 研究の目的

本研究は、流動場の複雑さ故に既往研究では全く取り扱われて来なかった強風下での激しい砕波を伴う風波気液界面を通しての運動量、熱および物質の輸送機構の解明とそれらの輸送量の評価を流体力学の見地から大型高速風波水槽を用いた精巧な室内実験により実施することを目的とする。特に、強風下での気液界面輸送は、気流の強い剪断力と砕波による気液2相乱流の生成、激しい砕波による大量の液滴飛散と気泡の巻込み、降雨等の因子により飛躍的に増大することが予想されるため、これらの因子の影響を実験的に解明したうえで、近年大型化する熱帯性サイクロンや集中豪雨等の発生・成長・発達・進路の正確な予測、及び地球の温暖化の進行を左右する大気・海洋間の炭素交換量の正確な予測に役立つモデルを構築することをめざす。

3. 研究の方法

(1) 高速風洞水槽での熱・物質輸送実験：高風速風洞水槽を使用し、砕波を伴う高風速領域において風波気液界面を通しての運動量の輸送機構の解明を試みる。現有の高速風波水槽は、最高風速 40m/s もの高風速を実現することが可能であり、輸送実験を通して台風下における大気・海洋の相互作用を再現できるものと考えられる。物質輸送実験では、CO₂を一定の高濃度で溶解した水道水を水槽内に満たし、液側から気側に放散するCO₂の量を計測した。熱輸送実験では、気温に対して15度程度過熱した水道水を水槽内に満た

し、液温の低下速度を測定した。

(2) 造波機を用いた大型風波水槽での物質輸送実験：風が接してからの下流方向距離である吹送距離の影響を調べスケールの異なる室内と海洋との間の相似性を検討するため、吹送距離が1km以上と非常に長い海洋上での風波と同じスペクトル形状を有する非線形波を再現できるコンピュータ制御の造波装置を水槽上流部に設置した。物質輸送実験では、CO₂を一定の高濃度で溶解した水道水を水槽内に満たし、液側から気側に放散するCO₂の量を計測した。

(3) 造波機を用いた高速風洞水槽での運動量輸送実験：風が接してからの下流方向距離である吹送距離の影響を調べることによりスケールの異なる室内と海洋との間の相似性を検討するため、吹送距離が50m程度と水槽の縦方向長さ（約10m）よりも長い海洋上での風波を再現できるコンピュータ制御の造波装置を水槽上流部に設置した。特に、高風速域においては風波スペクトル形状が分かっていないため、(2)で使用したような風波のスペクトル形状を造波装置に事前にインプットすることができない。そこで、ループ法と呼ばれる、水槽下流部において計測された水位変動データを造波装置にインプットすることにより、長吹送距離における風波を再現した。運動量輸送実験では、位相ドップラ式粒子流速形などを使用して、渦相関法により風波気液界面に作用する抗力を直接測定した。

(4) WRF や全球計算法を用いた運動量・熱・物質輸送シミュレーション：高速風洞水槽を用いて得られた Takagaki et al.(2012, GRL)の提案した台風直下における運動量輸送モデル、(1)で開発した熱・物質輸送モデルを使用して、既存の大気海洋間の運動量・熱・物質輸送モデルとの比較・検証を行った。具体的には、既存および新規の運動量・熱輸送モデルを、大気海洋結合モデル(WRF)に導入し、二つのケースに対して計算を行い、既存モデルと新規のモデルを用いた場合において、台風強度の予測結果を比較・検証した。また、物質輸送に関しては、高風速域におけるCO₂輸送量の推定を行い、全球規模での大気海洋間におけるCO₂輸送量に及ぼす影響を評価した。

4. 研究成果

(1) 高速風洞水槽での熱・物質輸送実験：高風速風洞水槽を使用し、砕波を伴う高風速領域において風波気液界面を通しての熱およびCO₂の輸送機構の解明を試みた。その結果、図1および図2に示すように風速20m/sを超える高風速域においては、CO₂の物質輸送係数 k_L 、顕熱輸送係数 C_H 、潜熱輸送係数

C_E およびエンタルピ輸送係数 C_K (図2)の風速依存性が風速 20m/s 以下の通常の風速域とは異なり急増することが明らかになった。

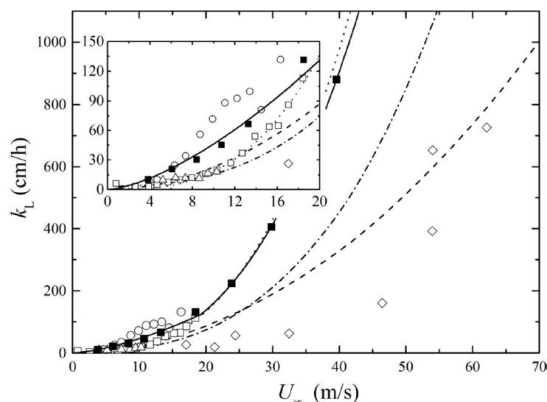


図1 物質移動係数と気側一様流速の関係，
■：本実験値，その他のプロット：既往研究の実験値，実線：本研究のモデル曲線，その他の曲線：既往研究のモデル曲線

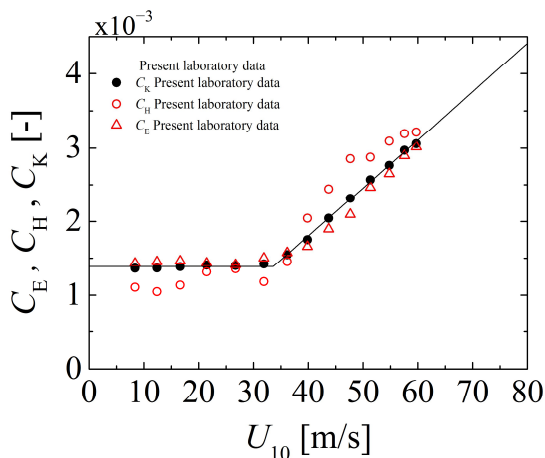


図2 顕熱移動係数，潜熱移動係数およびエンタルピ移動係数と海上 10m の位置における風速の関係

(2) 造波機を用いた大型風波水槽での物質移動実験： 大型風波水槽に取り付けた造波装置を使用して，低風速の状態において吹送距離が 1km 以上と非常に長い海洋上での風波気液界面を通しての CO_2 フラックスの測定を行った。その結果，吹送距離が 10m 程度の場合と吹送距離が 1km 以上の場合では，風波気液界面を通しての CO_2 フラックスは変化しないことが明らかとなった。

(3) 造波機を用いた高速風洞水槽での運動量輸送実験： 新規に作成した不規則波造波装置を高速風洞水槽に取り付け，高風速下かつ吹送距離が約 50m と長い海洋上での風波の再現実験を実施し，台風下を模した高風速下かつ長吹送距離の状態において，水位変動

測定および運動量フラックス測定を実施した。その結果，長吹送距離の状態であっても，短吹送距離の状態と同様に抗力係数が高風速域で一定値を取ること，局所平衡則が破綻すること，粗度長さは風波形状を用いてよく相関されることを明らかにした。

(4) WRF や全球計算法を用いた運動量・熱・物質輸送シミュレーション： Takagaki et al. (2012)が提案した台風直下における運動量輸送モデルおよび(1)において提案された熱輸送モデルを用いて，台風直下における運動量・熱輸送量の推定を行い，これらの運動量・熱輸送モデルが台風強度の予測に及ぼす影響について検討を行った。具体的には，平成 26 年 11 月に発生した台風 30 号 (Haiyen, T1330)，および米国において甚大な被害をもたらした平成 17 年 8 月に発生したハリケーン・カトリーナに関して予測計算を行った。モデルとしては，これまで台風予測計算で使用されている従来の運動量・熱輸送モデルと本研究において提案された新規の運動量・熱輸送モデルを使用し，両モデル間で台風の強度予測に及ぼす影響を比較検討した。その結果，新規の運動量・熱輸送モデルを使用した場合に，台風強度のピークが観測値により近づくことが明らかになった。これは，新規の運動量・熱輸送モデルを用いることにより，台風の強度の予測精度が向上することを意味している。

さらに，(1)において提案された台風直下における物質輸送モデルを用いて，高風速域における CO_2 輸送量の推定を行い，全球規模での大気海洋間における CO_2 輸送量との比較を行った。その結果，高風速域における CO_2 輸送量は全球規模での大気海洋間における CO_2 輸送量に比べてわずかであり，現状においては台風などの熱帯性低気圧が地球上の大気海洋間の炭素収支に及ぼす影響は小さいことが明らかになった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 4 件)

- (1) K. Iwano, N. Takagaki, R. Kurose, S. Komori, “Mass transfer velocity across the breaking air-water interface at extremely high wind speeds”, *Tellus B*, 65, 21341 (2013).
- (2) Takagaki, N., Komori, S. 2014. “Air-water mass transfer mechanism due to the impingement of a single liquid drop on the air-water interface”, *Int. J. Multiphase Flow* 60, 30-39, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2013.11.006>.
- (3) Takagaki, N., Kurose R., Baba Y., Nakajima

Y., Komori, S. 2014. "Relationship between momentum of an impinging drop and intensities of vortex rings generated below free surface", Int. J. Multiphase Flow 65, 1-10,

<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2014.05.005>.

- (4) N. Takagaki, R. Kurose, Y. Tsujimoto, S. Komori and K. Takahashi, "Effects of turbulent eddies and Langmuir circulations on scalar transfer in a sheared wind-driven liquid flow", Phys. Fluids 27, 016603 (2015);
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4905845>.

〔学会発表〕(計16件)

- (1) N. Takagaki, K. Iwano and S. Komori, "CORRELATION BETWEEN DRAG COEFFICIENT AND WAVE SLOPE AT EXTREMELY HIGH WIND SPEEDS", AGU Fall Meeting, Dec. 9-13, 2013, San Francisco, CA, USA.
- (2) N. Takagaki, K. Iwano and S. Komori, Statistical properties of wind waves generated in extremely-high wind condition, 2014 AGU Ocean Sciences Meeting, Hawaii, USA(Feb. 23-28), 2014.
- (3) 岩野耕治, 高垣直尚, 神内浩行, 西平守志, 黒瀬良二, 小森 悟, 「強風速下における風波気液界面を通しての物質輸送量の評価」, 日本流体力学会年会 2013, 東京農工大学小金井キャンパス, 2013.9.12-14.
- (4) 辻本悠太, 高垣直尚, 黒瀬良二, 小森 悟, 高橋桂子, 「風波気液界面を通してのスカラ輸送に及ぼす液側乱流渦とLangmuir circulation の影響」, 第91期日本機械学会流体工学部門講演会, 九州大学伊都キャンパス, 2013.11.9-10.
- (5) 辻本悠太, 高垣直尚, 黒瀬良二, 小森 悟, 「風波気液界面を通してのスカラ輸送に及ぼす Schmidt 数の影響」, 第27回数値流体力学シンポジウム, 名古屋大学東山キャンパス, 2013.12.17-19.
- (6) 小森 悟, 「風波気液界面における乱流輸送現象」, 日本機械学会 2014 年度年次大会, 東京電機大学東京千住キャンパス, 2014.09.7-10 (8日発表), K05100, 基調講演.
- (7) 岩野耕治, 石田瑞紀, 高井敬介, 高垣直尚, 黒瀬良二, 小森 悟, 高風速下における風波気液界面を通しての熱輸送量の評価, 日本流体力学会 年会 2014, 仙台, 東北大学 川内北キャンパス, 2014.09.15-17.
- (8) 高垣直尚, 室谷春樹, 越智啓介, 岩野耕治, 黒瀬良二, 小森悟, 長吹送距離における風波気液界面を通しての物質輸送量の評価, 仙台, 東北大学 川内北キャンパス,

2014.09.15-17.

- (9) 木村厚思, 辻本悠太, 高垣直尚, 黒瀬良二, 小森 悟, 風波気液界面を通しての熱輸送に関する直接数値シミュレーション, 第28回数値流体シンポジウム, 東京, タワーホール船堀, 2014.12.09-11.
- (10) 高垣直尚, 大気・海洋間を通しての物質輸送 - 高ウインドシア・吹送距離・雨滴衝突の影響 -, 日本機械学会関西支部流体力学懇話会 第174回研究会, 大阪市立大学 梅田サテライトキャンパス, 文化交流センター ホール, 2014年12月13日.
- (11) 小森 悟, 「大気・海洋間の運動量, 熱および物質の輸送機構の解明とモデル化」, 日本機械学会関西支部第90期定時総会講演会, 京都大学桂キャンパス, 2015.03.16-17 (16日発表), 特別講演.
- (12) N Takagaki, S Komori, K Iwano, R Kurose and N Suzuki, Spectral Shape of Wind Waves at Extreme High Wind Speeds, The 7th International Symposium on Gas Transfer at Water Surfaces, Keynote lecture, Seattle WA USA, May 18-21, 2015.
- (13) S Komori, Laboratory Measurements of Momentum, Heat and Mass Transfer across the Air-Water Interface at High Wind Speeds, The 7th International Symposium on Gas Transfer at Water Surfaces, Invited Lecture, Seattle WA USA, May 18-21, 2015.
- (14) 木村厚思, 三輪将也, 高垣直尚, 黒瀬良二, 小森 悟, 界面活性剤による風波の減衰作用, 化学工学会第48回秋季大会, 2015年9月9日, 北海道大学札幌キャンパス.
- (15) 小森 悟, 室内実験による高風速下での気液界面を通しての乱流輸送現象の解明とモデリング, 日本海洋学会シンポジウム 大気海洋間物質輸送と環境災害問題における波浪と界面微細過程の役割 -機械工学, 海岸工学, 船舶工学を交えて-, 2016年3月14日, 東京, 東京大学本郷キャンパス (招待講演).
- (16) 高垣直尚, 高風速下かつ長吹送距離における風波気液界面を通しての物質輸送量の評価, 日本海洋学会シンポジウム 大気海洋間物質輸送と環境災害問題における波浪と界面微細過程の役割 -機械工学, 海岸工学, 船舶工学を交えて-, 2016年3月14日, 東京, 東京大学本郷キャンパス.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.fluid.me.kyoto-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小森 悟 (KOMORI SATORU)
京都大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：60127082

(2) 研究分担者

黒瀬 良一 (KUROSE RYOICHI)
京都大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：70371622

高垣 直尚 (TAKAGAKI NAOHISA)
京都大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：00554221

(3) 連携研究者

鈴木 直弥 (SUZUKI NAOYA)
近畿大学・工学部・准教授
研究者番号：40422985